

터널 굴착면 여굴 최소화를 위한 발파암 분류(안) 및 공법 개발 연구

A Study on the Development of the Rock Blastability Classification
and the Methods for Minimizing Overbreak in Tunnel

이 태노, 김 동현, 서 영화

Tai-Ro Lee, Dong-Hyun Kim and Young-Hwa Seo

LG건설

초 록

터널 굴착면 여굴(Overbreak)은 발파공법에 의한 굴착 중에 필연적으로 발생하는 현상으로서 슛크리트, 라이닝 등의 보강비 추가 발생과 버력 처리량의 증대로 공기 및 공사비를 증가시키는 주요한 요인으로 작용한다. 또한 터널 굴착면 암반의 손상으로 균열층이 형성되거나 부석이 발생하여 안전문제를 야기시키기도 한다.

이러한 여굴 발생은 천공오차, 발파패턴의 오류, 잘못된 화약선정, 불규칙한 암반 특성 등에 그 원인이 있으나, 지금까지 터널 여굴은 천공 및 발파기술에 의해 좌우된다는 인식이 대부분이었다. 그러나 여굴 발생에 중요한 원인으로 터널 굴착면 암반의 특성과 이에 적합한 발파패턴 및 화약류를 들 수 있다.

본 연구는 여굴 발생에 영향을 미치는 암반상태를 파악하기 위해서 터널 굴착면 주변 암반의 균열정도, 강도, 불연속면의 간격, 방향, 간극, 충전물 상태 등의 6가지 요소를 이용하여 암반을 분류하는 발파암 분류법(BI)을 새로 제안하였고, 이 분류에 따라 외곽공의 간격과 장약밀도를 달리 하는 발파패턴을 정립하였다. 또한 화약의 순폭도와 Air Deck 효과를 이용하여 장약밀도를 조절할 수 있는 N.D.C(New Deck Charge) 발파공법을 개발함으로써 여굴을 최소화할 수 있었다.

핵심어 : 여굴, 발파암 분류법(BI), 장약밀도, 순폭도, Air Deck 효과, N.D.C 발파공법

1. 서 론

최근의 국내 터널공사 기술은 급속도로 발전해가고 있다. 대형 천공장비 및 보강장비가 투입되고, 장공 천공이 설계에 반영되

면서 굴진 속도가 빨라지고 있다. 또한 굴진효율을 증대시키고 발파공해를 최소화할 수 있는 새로운 개념의 발파공법이 적용되고 있으며, 막장 암반을 파악하여 천공패턴을 변화시키는 기술이 도입되고 있다. 그러

나 터널 굴착선의 여굴을 줄이기 위한 노력은 상대적으로 소홀하였다. 현재 여굴 최소화를 위해 조절발파공법 (Controlled Blasting)을 적용하고 있으나, 암반상태와 발파조건이 고려되지 않은 채 일률적으로 동일한 패턴으로 설계되고 사용하고 있기 때문에 좋은 효과를 얻지 못하고 있다.

터널공사에서 여굴 최소화의 목적은 크게 암반의 손상방지과 터널 설계단면의 최적화 유지에 있다. 다시 말해서 여굴이 크게 발생하게 되면 암반보강을 위한 Rock bolt 및 Shotcrete 타설비 등의 보강비가 증가하고, 버력량의 증가로 인한 발파암 처리시간이 장시간 소요되어 공기가 지연되는 원인이 되며, 암반의 손상 역역이 확대되어 Key Block 및 부석이 발생하여 낙반 등의 안전사고를 초래할 수 있다. 또한 암반 손상영역의 확대는 암반의 틈새를 통해 지하수 유출 경로가 형성되어 암반을 안정적으로 유지하는데 어려움이 많다. 기 발표된 통계자료에 의하면 터널 굴착선 여굴에 의해 추가로 소요되는 비용은 터널공사비의 15~18%를 차지하는 것으로 나타나고 있다(한국도로공사, 1995). 실제, 건설표준품셈 기준에 의하면 천단 15~20cm, 측벽 10~15cm로 여굴 발생을 제한하고 있으며, 설계에 반영하고 있다. 그러나 현장에서의 실제 여굴

발생량은 이보다 큰 30~40cm 이상이 일반적이며, 심지어는 1m 이상의 여굴이 발생하는 경우도 많다. 그렇지만 국내 터널 기술자들의 여굴에 대한 인식 부족으로 여굴최소화를 위한 노력이 부족한 것이 현실이다.

본 연구에서는 국내 터널현장에서 발생하는 여굴 원인을 분석하고 이에 대한 개선방안을 모색하였다. 이를 통해 여굴 최소화를 위한 발파암 분류기준안을 제안하였으며, 암반의 특성과 화약류의 특성을 고려한 N.D.C 발파공법을 개발하게 되었다. 이러한 연구성과를 Pilot 현장에 적용 실험한 결과 여굴이 감소되는 결과를 도출하였으며, 터널 공사비가 상당히 절감되는 효과가 나타났다.

2. 국내 터널공사 여굴 기준 및 현황

2.1 국내 터널 여굴 허용 기준

발파공법을 이용하여 터널을 굴착하게 되면 필연적으로 굴착선에 여굴이 발생하게 된다. 여굴은 터널의 안정성 문제에 있어 중요 고려사항이며, 공사비를 증가시키는 절대적 요인이기도 하다. 여굴이 발생하는 여러 가지 원인 중 불변의 요인이라 할 수 있는 천공오차(look-out)는 천공장이 길어

표 1. 발주 기관별 여굴 반영 현황

구분	적용기준(cm)		비고
	아치부	측벽부	
건설표준 품셈	15~20	10~15	
서울지하철	20	20	
한국전력공사	15	15	LEG DRILL 사용시
	20	20	JUMBO DRILL 사용시
철도청	15	15	
한국석유공사	17.5	12.5	비축기지
한국통신	20	20	

질수록 증가할 수밖에 없다. 그래서 국내에서는 허용 여굴량을 설정하여 설계에 반영하고 있으며, 공사비에 포함시켜 발주가 이루어지고 있다. 또한 허용 여굴량은 각 발주처별로 약간씩 다르게 설정하고 있는데, 일반적으로 건설표준품셈에서 제시하고 있는 허용 기준량을 적용하고 있다. 표 1은 각 기관별 허용 여굴 기준이다.

이와 같은 기준은 굴진장이 1.5~2.0m 정도일 경우를 고려해서 설정된 것이기 때문에 천공장에 따른 천공오차 한계를 감안하여 대개 15~20cm로 설정하고 있다. 그러나, 오늘날에는 3.0m 이상의 장공 천공이 이루어지기 때문에 천공오차의 확대에 여굴량이 증가할 수밖에 없다. 따라서 현장에서는 여굴량을 감수하면서 천공장을 증대시켜야 하는가, 아니면 여굴량을 최소화시키기 위해서 천공장을 줄여야 하는가에 대한 고

민에 당면하게 된다.

2.2 국내 터널 여굴 현황

국내 터널현장의 여굴은 천공장의 길이에 따라 차이는 있지만 천공장은 암질상태와 상호 보완적 관계가 있기 때문에 천공장과 관계없이 여굴량은 거의 비슷하게 발생하게 된다. 다시 말해서 천공장이 길어지는 막장에서는 암질이 우수하고 불연속면이 발달되지 않았기 때문에 여굴량은 천공오차에 좌우되며, 천공장이 짧은 막장에서는 암질이 불량하고 불연속면이 발달되어 있기 때문에 여굴량이 암반의 특성에 좌우된다. 한국도로공사의 연구보고서('02)에 의하면 중부고속도로 터널현장 조사결과, 반단면에서의 평균 여굴깊이는 41.4cm, 전단면에서는 34.5cm로 분석되었다. 표 2는 한국도로공사 연구결과에 의한 여굴현황이다.

표 2. 중부내륙 고속도로 터널현장의 여굴현황('02 한국도로공사)

구 분	적용 발파공법	천공장(mm)	여굴량(mm)	평균(mm)
전단면 발파	L.C-Cut	3,300	343	345
		3,300	339	
		3,500	321	
		4,000	258	
		3,950	394	
		4,000	416	
반단면 발파	V-Cut	1,650	453	414
		1,750	541	
		2,200	456	
		2,200	735	
	L.C-Cut	1,700	192	
		2,200	310	
		2,130	216	

또한 본 연구에서는 국내 철도 터널현장에서 발생하는 여굴량을 측정하기 위해서 현장실험을 수행하였다. 현장실험은 (주)LG 건설이 공사하는 경춘선 복선공사 터널현장에서 이루어졌는데, 터널 단면적이 86.8 m²으로 도로터널과는 달리 터널 단면적이 다소 작다. 실험 막장의 암반은 편마암으로 구성되어 있으며, 암반상태는 RMR 값이 50~70 정도로 경암 내지 보통암 수준의 암반이었다.

여굴량 조사는 총 15회에 걸쳐 이루어졌는데, 그림 1과 같이 터널 단면측량을 위해 사용된 장비는 AMT Profiler 광학 측정기로서, 본 장비를 이용하여 한 단면당 200개 이상의 측정점에 대한 Data를 수집하였다.

광학 측정기는 1 발과당 2회를 사용하였는데, 1회 굴진거리의 처음 지점과 끝지점에 설치하여 여굴량을 측정하였다. 측정은 무소자 광파기를 회전시키면서 단면의 위치 좌표를 측정하고, 측정간격은 회전각도를

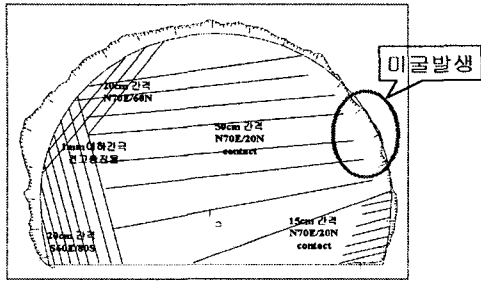
조정함으로써 설정할 수 있는데, 현장에서 는 단면을 따라 약 10cm 간격으로 측정하였다. 측정 결과 전체적으로 평균 40 cm 내외로 나타났고, 표 3은 현장에서 여굴량을 측정한 결과표이며, 그림 2는 AMT Profiler를 이용하여 측정된 터널 굴착선 실측도이다.



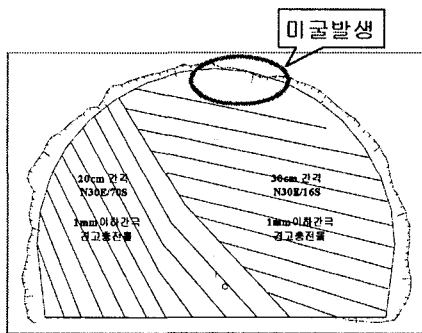
그림 1. AMT Profiler

표 3. 터널 여굴 측정결과(경춘선 복선공사 현장)

회수	단면적(m ²)	여굴면적(m ²)	평균여굴깊이(cm)	RMR
1	97.2	10.4	41.2	II
2	95.36	8.56	34.1	II
3	95.98	9.18	36.5	II
4	94.90	8.10	32.3	II
5	96.53	9.73	38.6	II
6	97.05	10.24	40.6	II
7	96.61	9.80	38.9	II
8	93.85	7.05	28.2	II
9	98.04	11.23	44.4	III
10	97.33	10.53	41.7	III
11	96.01	9.21	36.6	III
12	98.17	11.37	44.9	III
13	97.25	10.45	41.2	III
14	98.46	11.65	46.0	III
15	98.72	11.92	47.0	III



(a) 여굴깊이가 41.7cm의 경우



(b) 여굴깊이가 41.2cm의 경우

그림 2. 터널 굴착선 실측도

2.3 여굴발생 원인분석 및 문제점 도출

터널 발파 시 발생하는 여굴의 원인은 크게 암반의 특성, 화약류 성능, 시공성으로 구분할 수 있다. 이와 같은 3가지 특성은 복합적으로 영향을 미치기 때문에 한 가지 특성만을 고려하여 여굴의 원인으로 한정짓는 것은 바람직하지 못하다. 국내 터널현장에서 여굴량이 크게 발생하는 원인 및 문제점을 나열하면 다음과 같다.

(1) 암반의 특성

발파대상 암반층의 생성시기, 지각변동, 풍화정도에 따라 발파효과 및 여굴상태가 상당히 다르게 나타난다. 일반적으로 밀도가 낮은 암석은 상대적으로 낮은 에너지에서도 쉽게 부서지고 여굴이 많이 발생하는

경우가 많고, 입자가 치밀한 암석은 발파 시 더 많은 에너지를 필요로 하지만 여굴이 덜 생기는 특성이 있다. 암석의 강도가 클수록 화약량이 많아지지만 여굴은 적게 생기며, 강도가 작은 암반에서는 화약량이 적게 소요되지만 여굴이 많이 발생한다. 또한, 불연속면은 천공 rod의 힘을 유도하고 응력이 집중되는 현상을 일으켜 crack이 발전하는 요인이 된다.

터널굴착을 위한 발파패턴은 지보패턴을 결정하기 위한 공학적 암반분류(RMR, Q-system)를 기초로 하여 결정하고 있다. 그러나 공학적 암반분류값은 터널의 무지보 자립시간 결정과 지보량을 결정하는 요인으로 활용되기 때문에 발파의 난이도와 여굴 최소화를 위한 발파패턴 설계 기준으로는 부적합하다. 그래서 여굴 최소화를 위한 별도의 발파암 분류기준이 설정되어 반영되어야 한다.

(2) 화약류의 성능

국내에서 생산되는 화약류 중 터널 굴착선의 여굴을 줄이기 위해 사용되는 화약류는 정밀폭약이다. 그러나 이 폭약은 저폭속(4,400m/sec)으로 폭발위력이 떨어져 경암이 노출되는 구간에서는 충분한 파괴효과를 발휘하지 못하여 여굴 또는 미굴이 자주 발생한다. 또한 폭발감도 및 가비중(1.0g/cm³)이 다른 화약에 비해 떨어져 현장에서 발파작업 시 불발되는 경우가 많이 발생하여 암반의 파쇄효과가 상대적으로 저조한 실정이다. 특히 불발된 화약이 파쇄된 암석 덩어리 속에 파묻혀 있기 때문에 버려처리 작업 시 폭발할 위험성이 존재하여 안전관리에 어려움이 많이 발생한다.

터널 굴착선이 미려하게 절단되기 위해서는 천공경과 화약류 직경의 관계가 매우 중

요하다. 이러한 관계를 디커플링 지수 (Decoupling Index)라 하며, 조절발파의 최대효과를 내기 위해서는 디커플링 지수가 2.0~2.5 정도, 장약밀도는 250g/m로 유지되어야 하는데(U. Langefors), 국내에서 주로 사용되는 정밀폭약은 디커플링 지수는 2.7 정도이며, 장약밀도는 235g/m로 파괴력이 떨어질 수밖에 없다. 그 영향으로 터널 굴착선의 여굴 또는 미굴이 발생하게 된다.

(3) 시공성 측면

최근 발파를 위해 사용되는 천공장비는 Jumbo Drill을 사용하고 있으며, Jumbo Drill 장비 피드 부분의 특성상 천공비트를 굴착 예정선에 위치시킬 수 없다. 그래서 천공비트를 굴착 예정선으로부터 10cm 하부 지점에 설치하여 천공하게 된다. 이럴 경우 터널단면을 유지시키기 위해서 천공각도를 최소 3~4° 정도를 세워서 천공하게 되며, 이와 같은 경사천공으로 인하여 이루어지는 외향각(Look-Out)으로 천공오차가 발생하게 되어, 발파 시 불가피하게 여굴이 발생한다. 또한 천공 작업자의 숙련도에 따라 천공각도와 공간격이 일정하지 않은 경우가 많이 발생하며, 특히, 미굴이 우려되는 경우 굴착선 바깥에서부터 천공을 시작함으로써 과다 여굴의 직접적인 원인이 된다.

3. 여굴 최소화 개선과 기술개발

불균질한 암반조건은 많은 학자들에 의해 여굴 발생의 주요 원인으로 지목되어 왔고, 이에 대한 다양한 연구가 이루어졌다. 그러나 여굴에 직접적으로 영향을 미치는 것은 굴착선 부근의 암반 상태로, 이를 반영할 수 있는 정량적인 발파암 분류법과 이에 따른 여굴 방지 방법이 충분히 정립되지 않았

다. 또한 조절발파용 화약류의 성능 및 특성으로 인해 발생하는 여굴 원인 역시 기술 개선이 요구되고 있다.

3.1 여굴 최소화를 위한 발파암 분류법 제안

(1) 기존 발파암 분류법의 문제점

국내에 널리 알려진 대표적인 발파암 분류법은 Lilly가 제안한 분류법과 한국지질자원연구원에서 제안한 분류법이 있는데, 이들은 막장 암반의 구조역학적 특성이 고려된 인자들의 배점을 합산하여 발파 용이도를 평가하는 분류법이다.

표 4. Blastability Index (Lilly, 1986)

Parameter	Rating
1. RMD (Rock Mass Description)	
Powdery or Friable	10
Blocky	20
Totally Massive	50
2. JPS (Joint Plane Spacing)	
Close(<0.1m)	10
Intermediate(0.1 to 1m)	20
Wide(>1m)	50
3. JPO (Joint Plane Orientation)	
Horizontal	10
Dip out of face	20
Strike normal to face	30
Dip into Face	40
4. SGI (Specific Gravity Influence)	
SGI = 25 × SG - 50 (SG : t/m ³)	
5. Hardness(H)	1 to 10

발파 용이도의 초기 개념은 Langefors 와 Kihlström(1978)가 기본 장약밀도의 근거로 단순한 개념으로서의 암반상수 'c'를 제시한 것이었다. 이 개념은 Lilly(1986)에 의해

Blastability Index로 보다 체계화되어 발전되었는데, 이는 표 4와 같이 RMD(Rock Mass Description), JPS(Joint Plane Spacing), JPO(Joint Plane Orientation), SGI(Specific Gravity Influence), HD(Hardness)의 항목들의 합으로 발파암 분류를 수행하였다. 또한 국내에서는 1996년에 한국지질자원연구원과 한양대에서 Lilly의 BI에 WI(Water Intensity) 지수를 도입하고 배점을 수정한 새로운 발파암 분류법을 제시한 바 있으며, 오스트리아에서는 표 5와 같이 발파결과의 개념을 도입한 JKMRC 등, 각 현장별 특성에 맞게 발파암

분류 연구가 이루어져왔다. 그러나 기존의 발파암 분류법들은 발파 효율에 초점을 두어 만들어진 것으로 여굴최소화를 고려한 암반분류는 이루어지지 않았다.

(2) 여굴 최소화를 위한 발파암분류법 제안
터널 막장의 암반 중 여굴 발생 정도와 직접적으로 관련되는 것은 굴착선 부근의 암반조건이다. 굴착선 부근의 암질 및 굴착선과 불연속면이 이루는 각, 그리고 불연속면의 상태 등은 발파 후 굴착선의 모양이 형성되는데 중요한 역할을 한다. 그렇지만 일정한 방향의 불연속면은 굴착선에 따라

표 5. Blastability 분석 (JKMRC, 1996)

		Dragline Operation	Dragline Operation Vast Blast	Shovel Operation	Shovel Operation Wet	Parting F.E.L
Rock Mass						
Strength	MPa	60	60	50	50	40
Density	gm/cc	2.51	2.51	2.47	2.47	2.42
E	GPa	12	12	10	10	10
Structure						
Block Size	m	2	2	2	2	0.5
Structure	1 to 9	5	5	5	5	3
Design						
Target Fragment						
Size	m	0.5	0.5	0.3	0.3	0.15
Heave	1 to 9	5	10	5	5	7
Confine	1 to 9	5	5	5	5	7
Scale	1 to 9	3	3	5	5	7
Environment						
Water	1 to 9	1	1	1	5	1
Indices						
Strength		0.30	0.30	0.25	0.25	0.20
Breakage		0.08	0.08	0.13	0.13	0.06
Heave		0.25	0.51	0.26	0.26	0.36
Modifiers		-0.02	0.03	0.00	0.08	0.02
Powder Factor						
	kg/T	0.18	0.24	0.17	0.21	0.16
	kg/m ³	0.44	0.61	0.42	0.52	0.39

형성되는 각도가 다르게 된다. 예를 들어 그림 3과 같이 천단과 이루는 각도가 20° 이하일 경우라도 측벽과 이루는 각도는 60° 이상이 될 수 있다. 따라서 터널 형상에 따라 각도가 다르게 나타나는 경우를 반영할 수 있는 새로운 발파암 분류가 요구된다.

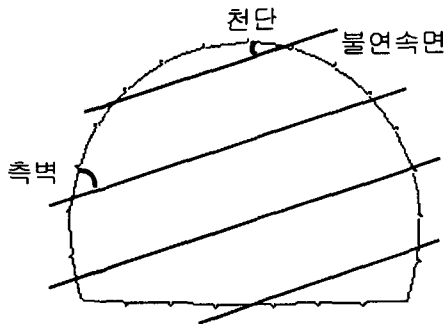


그림 3. 굴착선과 불연속면과의 각

또한 같은 막장이라도 파쇄대 및 관입 등의 영향으로 암질 특성이 판이하게 다를 수 있는데 이를 고려할 수 있는 발파암 분류가 필요하다. 앞서 설명하였듯이 기존 암반분류법이나 발파암 분류법들은 이러한 문제점들을 해결할 수 없기 때문에, 본 연구에서는 막장의 굴착선 부근의 지반을 5~6 등분하여 부분적이고 연속적인, 또한 굴착선 부근 암반조건을 표현할 수 있는 여굴 최소화를 위한 새로운 발파암 분류법을 표 6과 같이 제안하였다.

여굴 최소화를 위한 발파암 분류의 요소로 발파와 밀접한 관련이 있는 일반적인 지질학적 요소들과 실제 현장경험을 통해 파악된 대표적인 6가지 요소를 정하고, 각각의 가중치에 따라 점수를 배분하였다.

① RMD(Rock Mass Description) : 균열정도

불연속면이 거의 없는 신선한 암괴는 발

파가 어려우나, 공과 공 사이의 선균열을 통해 여굴면 조절이 용이하다. 파쇄된 암반은 작은 장약량에도 파괴되나 여굴 발생이 많아지고, 암반 손상 영역이 증가한다. 표 6과 같이 암반의 불연속면 구조에 대해 육안에 의한 경험적 판단과 RQD에 의한 정량적 판단, 풍화정도에 의한 판단방법을 제시하여 0~15의 점수를 분배하였다.

② UCS(Uniaxial Compressive Strength) : 일축압축강도

암반의 일축압축강도는 발파에 있어 중요한 요소이다. 20GPa 이상의 탄성계수와 50MPa를 넘는 일축압축강도를 가지는 양호한 암반은 원하는 굴착선 조절이 보다 쉽고 알려졌다(Cunnigham and Goetzche, 1990). 그러나 불연속면이 없다면 약한 암에서도 여굴을 최소화하는 것이 가능하다.

일축압축강도는 암반의 발파 용이도를 대표하는 인자로 화약량 결정의 중요 factor가 된다. 탄성과 속도는 일축압축강도와 일정 정도의 상관관계가 있기 때문에 화약류의 선정은 암반의 탄성과 속도에 의해 결정된다.

③ JPS(Joint Plane Spacing) : 불연속면 간격

불연속면은 그 자체가 인장강도가 암반에 비해 낮을 뿐 아니라 발파에너지 즉, 파의 전파가 불연속면에 집중되어 약화되므로, 불연속면의 존재는 발파에 의한 여굴과 매우 밀접한 관련이 있다. 불연속면의 간격이 커질수록 암반은 암괴에 가깝게 거동하여 여굴 조절이 용이하며, 불연속면과 불연속면이 근접할수록 서로에 대한 영향으로 여굴 발생 정도가 커질 수 있다.

표 6. 여굴최소화를 위한 발파암 분류표

외곽공 발파암분류 (BI)										
현장명					일자					
터널명					측정 위치	Sta.				
작성자					확인자					
1.RMD(암괴장도)					점수	①	②	③	④	⑤
파쇄(Powdery)	RQD < 25		HW		0					
다소의 불연속면(Blocky)	25 ≤ RQD < 50		MW		5					
	50 ≤ RQD < 75		SW		10					
암괴상(Massive)	75 ≤ RQD		F		15					
2.CS(일축압축강도)						①	②	③	④	⑤
분류	극경암	경암	보통암	연암	중화암					
일축강도(kg/m ²)	2000	1500	1000	650	500	250				
점수	20	15	10	5	2	0				
3.JPS(절리간격)						①	②	③	④	⑤
절리간격	1.5m	1.2m	0.8m	0.4m	0.1m	0.05m				
점수	20	15	10	5	2	0				
4.JPO(절리방향)						①	②	③	④	⑤
주향(strike)과 굴진방향 사이각 : α 기준경사와 불연속면과의 각 : β $JPO = 25 - 12.5(\cos \alpha_1 + \cos \beta_1) - 12.5(\cos \alpha_2 + \cos \beta_2) - \Lambda$										
1. JPO < 0 일 경우는 JPO = 0 2. Cos 값										
5.JPA(절리간격) & FM(충진물)						①	②	③	④	⑤
JPA	FM									
	Open	느슨한 상태	보통	견고한 상태						
	>2.0 mm	0	3	6	9					
	1.0 mm ~ 2.0 mm	3	6	9	12					
	0.5 mm ~ 1.0 mm	6	9	12	15					
<0.5 mm	9	12	15	18						
contact					20					
부분	①	②	③	④	⑤	평균				
총점										
등급										

④ JPO(Joint Plane Orientation) : 불연속면의 방향

불연속면의 방향은 여굴발생의 중요 요인이 된다. Worsey 등(1981)은 실내/현장실험을 통하여 불연속면이 굴착선과 이루는 각도가 60도 이하가 될 경우에는 정밀발파가 어려우며, 15도 이하일 경우에는 정밀발파의 효과가 거의 없다는 결론을 내렸다. 그리고 불연속면의 주향이 터널 굴진방향과 수직일 경우에는 여굴이 거의 발생되지 않

았으며, 주향에 수직일 경우 과도한 여굴과 손상이 발생하였음이 관찰되었다 (Singh, 2000).

굴착방향과 거의 수직인 주향을 가지는 불연속면에서는 여굴이 최소화되는 경향이 있다. 반대로 불연속면이 굴착축과 평행하다면 많은 여굴이 발생한다(Issac, 1981).

⑤ JPA(Joint Plane Aperture) & FM(Filling Material) : 간극과 충진물

Worsey & Qu(1987)는 불연속면 간극의 증가는 심각한 여굴의 원인이 되고, 불연속면이 밀착되어있을 때는 양호한 상태를 보인다고 하였다. 불연속면 사이의 점토물질의 협재는 팽창성과 두께 정도에 따라 여굴 혹은 미굴이 될 수 있는 악영향을 미친다. 불연속면 간극이 작고 강하고 견고한 물질로 충전되었다면 여굴은 불연속면의 방향성에 의해 좌우될 것이다. JPA와 FM은 서로 밀접히 연관되어 있는 것으로, 이들을 하나의 분류로 묶어 산정한다.

발파암 분류는 이들 5분류의 합으로 계산되며 0~100의 값을 가지고, 요소들의 가중치는 현장에 따라 달라질 수 있다.

3.2 N.D.C(New Deck Charge) 발파공법 개발

대부분의 국내 터널 현장에서는 굴착선을 미려하게 유지시키고 여굴량을 최소화 하기 위한 방법으로 조절발파의 일종인 Smooth Blasting 방법을 적용하고 있으며, 조절발파효과를 극대화하기 위해 외곽공에 일반화약 대신 정밀폭약을 사용하고 있다. 그러나 국내에서 생산되는 정밀폭약의 포장재질 및 특성 상 장약밀도를 조절하는 것이 불가능하여, 본 연구에서 제안한 발파암 분류에 따른 적정 장약밀도의 조정이 이루어질 수가 없다. 또한 폭력이 일반화약보다 약하기 때문에 경암에서는 파괴효과를 충분히 발휘하지 못해 미굴이 발생하는 사례가 빈번히 발생하였다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 New Deck Charge(N.D.C) 발파공법을 고안하게 되었다.

(1) N.D.C 발파공법의 원리

N.D.C 발파공법은 두 가지 원리를 이용

하였다. 첫째, 화약의 공내 순폭(Sympathetic detonation in hole)을 이용하여 화약과 화약 사이의 거리를 띄움으로써 장약밀도를 조정하는 원리이다. 일반적으로 화약의 순폭상태를 평가하기 위한 순폭도는 일반적으로 모래 위에서 실험하는 사상 순폭시험을 통해 측정하게 되는데, 순폭거리가 보통 화약 직경의 2~4배 정도로 알려져 있다. 그러나 보통 암반에 천공된 공내에서의 순폭도는 밀폐된 공간에서 폭발이 이루어지기 때문에 사상 순폭도보다 10~20배 이상 커진다. 이러한 화약의 순폭도를 이용하여 공내 장약밀도를 조절할 수 있다. 둘째는 Air Deck 효과를 이용하는 것이다. 화약과 화약 사이의 공간이 deck 역할을 하여 일반화약으로도 정밀폭약 효과를 낼 수 있다. 종합하면, N.D.C 발파공법은 그림 4와 같이 화약의 순폭도와 Air Deck 효과를 이용한 발파공법이다.

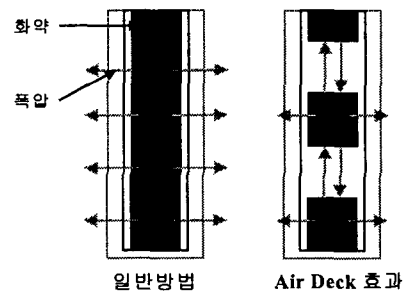


그림 4. Air Deck Effect

(2) 분리봉 제작 및 특성

공내에서 적정 장약밀도를 유지하고 시공을 용이하게 하기 위해서 화약과 화약 사이의 공간을 띄우는 방법으로 종이 관형 분리봉을 개발하였다. 이 분리봉은 종이 재질로 제작되어 비용이 저렴하며, 가벼운 관형(管形)으로 이루어져 있기 때문에 설치가 간편하고 화약간의 간격을 유지할 수 있다. 또

한 분리봉의 중심이 빈 공간으로 되어 있기 때문에 폭발압력이 화약에 직접 전달되어 순폭도를 유지할 수 있다. 그림 5는 분리봉을 이용한 N.D.C 발파공법의 개념도이다.

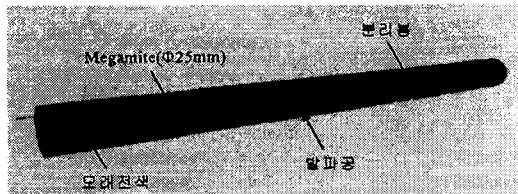


그림 5. N.D.C 발파공법 개념도

(3) 분리봉을 이용한 화약의 순폭시험

본 연구를 통해 개발된 분리봉의 성능과 화약의 순폭상태를 파악하기 위해서 (주)한화와 공동으로 인천공장에서 2차에 걸친 순폭시험을 실시하였다. 시험방법은 암반의 천공상태와 유사한 조건으로 맞추기 위해 직경이 43mm, 두께가 2mm인, 한쪽이 밀폐된 철판을 사용하였다. 철판 내부에 화약과 분리봉을 그림 6과 같이 장약하여 10회 걸쳐 시험발파를 실시하였다. 수차례에 걸친 순폭시험의 실패를 거쳐 표 7과 같이 최적의 분리봉 사양을 설정할 수 있었고, 분리봉을 사용하여 화약간 거리가 50cm 일 경우에도 화약이 완전히 순폭되는 것을 검증하게 되었다.

4. 발파암 분류 및 N.D.C 발파공법 현장 적용

표 7. 최적의 분리봉 사양

형 태	재 질	외 경	내 경	내수성
관 형	기름종이	20 mm	19.5 mm	5시간 가능

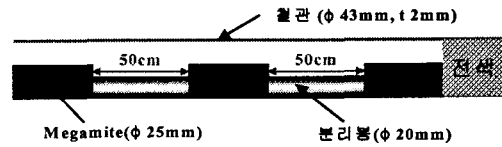


그림 6. N.D.C공법 검증실험 모형도

4.1 발파암 분류기준에 따른 외곽공 발파 패턴 정립

앞장에서 기술한 발파암 분류표를 이용하여 경춘선 복선공사 터널현장에 적용하여 암반을 분류하였으며, 여굴상태를 측정하였다. 발파암 분류 대상 구간은 막장면 전체가 아닌 터널 굴착선 주변의 암반을 대상으로 하였으며, 5개의 단면으로 분할하여 조사하였다. 여굴상태 조사 시점은 발파가 완료되고 부석을 완전히 제거한 다음에 이루어졌다. 이는 안전관리 측면도 있지만 굴착선 암반에 존재하는 부석은 암분류에 혼선을 줄 수 있고, 실질적 여굴상태 확인에 장애가 되기 때문이다. 그 결과 발파암 분류표에서 설정한 분류등급(BI)과 여굴상태를 상호 비교분석한 결과 그림 7과 같은 결과를 얻었다. 여기서 발파암 등급이 낮을수록 과다여굴이 발생하고, 발파암 등급이 높을수록 여굴이 줄어들며, 오히려 미굴 발생이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과의 원인을 분석해보면 현장에서는 발파암 등급에 관계없이 외곽공에 동일한 장약 밀도로 화약을 장약하고 있기 때문이다. 이에 따라 발파암 등급이 낮은 곳에서는 과다장약이 되는 경우가 되며, 발파암 등급이

높은 곳에서는 과소장약으로 작용하고 있기 때문에 발생한 것으로 사료된다.

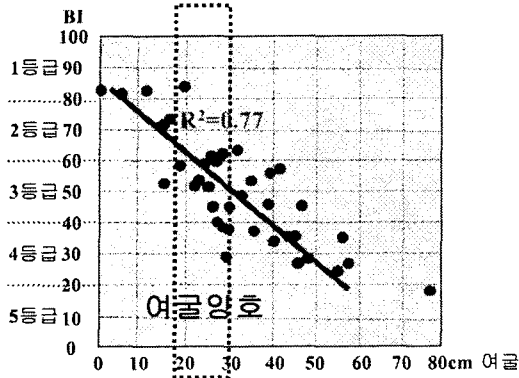


그림 7. 여굴과 발파암 분류와의 관계

이와 같이 본 연구를 통해 정립된 발파암 분류기준과 현장에서의 발파시험을 통해 발파암 등급에 따라 장약밀도를 조절함으로써 여굴을 제어하고자 하였으며, 표 8과 같이

외곽공의 적정 장약밀도와 발파패턴을 정립하게 되었다.

4.2 N.D.C 발파공법 적용시험

N.D.C 발파공법 현장 적용기준은 표 8의 기준을 근거로 하여 설정하였으며, 천공장에 따라 화약량을 달리하여 시험발파를 실시하였다. 시험발파 대상 막장의 암반상태는 RMR 값이 60~70 정도로 굴착패턴 II에 해당되어 천공장을 3.0m 로 하였다. 터널 굴착선에 배열되는 외곽공의 장약패턴은 표 9와 같이 기존방법과는 전혀 다르게 진행되었다.

외곽공의 장약방법은 설계패턴을 준수하여 정확히 실시하였으며, 공내에 기폭약포를 삽입한 후 분리봉, 화약을 연속적으로 삽입한 후 메지를 이용하여 공입구를 완전히 밀폐 시켰다. 그림 8은 외곽공에 분리봉과 화약을 설치하는 장면이다.

표 8. 발파암 분류기준에 따른 외곽공 발파패턴(천공장 : 3.0m 기준)

구 분	분류기준					현재기준
	I	II	III	IV	V	
외곽공 간격(m)	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.6
장약밀도(kg/m)	0.25	0.23	0.21	0.19	0.17	0.23
분리봉길이(cm)	25	30	35	45	50	-
전색장	43	29	50	41	62	47

표 9. 외곽공 장약패턴

구 분	기존 발파공법	N.D.C 발파공법
장약방식	연속적으로 장약	순폭을 이용한 부분장약
사용 화약종류 및 개수	· Megamite(φ32mm)×1EA · Finex I(φ17mm)×4 EA	· Megamite(φ25mm)×5EA
공당 화약량	0.775 Kg	0.625 Kg
분리봉	-	35cm × 4EA

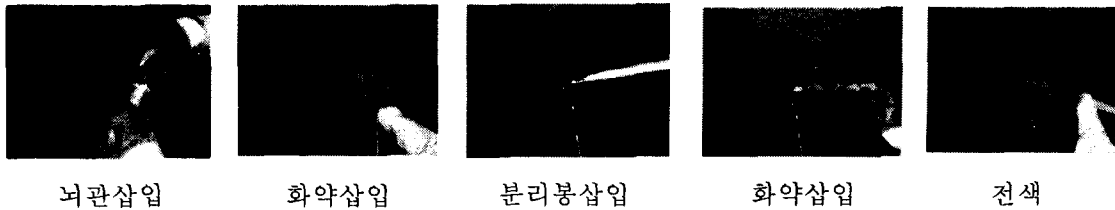


그림 8. N.D.C 발파공법 작업 공정

4.3 현장적용 결과 분석

터널 발파를 위해 굴착선을 따라 배열된 외곽공에 발파암 분류기준에 의한 발파패턴과 N.D.C 발파공법을 적용하여 10회에 걸쳐 실시한 결과 기존 발파공법에서 측정된 여굴량보다 현저히 감소되었음을 확인하였다.

기존 발파패턴 및 발파공법을 적용하였을 경우에는 여굴 깊이가 평균적으로 40 cm 내외로 측정되었으나, 본 연구를 통해 개발된 발파암 분류기준과 N.D.C 발파공법을 적용한 결과 여굴 깊이가 평균 27.6 cm 정도로 나타났다. 또한 기존에는 굴착선이 상당히 굴곡이 심하고 부분적으로 췌기파괴가 발생하였는데 반해, N.D.C 발파공법을 적용한 구간에서는 굴착선이 깨끗하고 절단되었음이 확인되었다. 그림 9는 발파완료 후 AMT Profiler 장비를 이용하여 굴착선을 측정한 결과의 한 예이다.

5. 결론

터널의 굴착선 여굴최소화는 터널공사에 있어서 공기 및 공사비에 직접적으로 연관이 되고 암반의 안정성에 절대적으로 영향을 줌에도 불구하고 이를 위한 노력과 관심은 그리 많지 않은 것이 현실이다. 본 연구에서는 터널의 여굴을 최소화시키기 위해서 기존의 현상과 문제점을 분석하여 새로운 발파패턴 및 발파공법을 개발하게 되었다. 여굴과 직접적으로 관련된 굴착선 부근 암반의 특성을 고려하여 발파암 분류기준을 새로이 정립하였으며, 이에 따라 발파패턴을 제시함으로써 여굴 감소를 위한 실질적인 현장 적용이 가능하게 하였다. 또한 화약의 순폭도와 Air Deck 효과를 이용하는 N.D.C 발파공법을 개발하였는데, 이는 기존의 조절발파의 문제점을 개선한 새로운 발

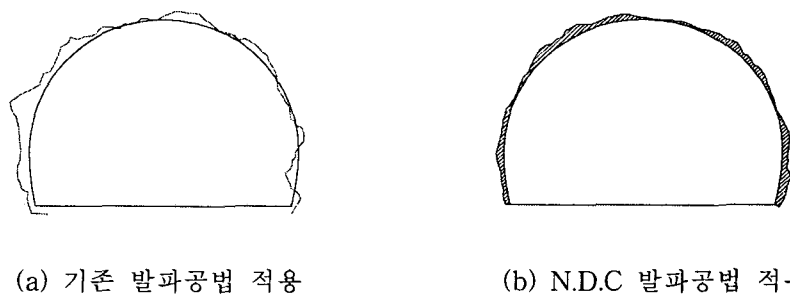


그림 9. 발파완료 후 측정된 굴착선 형태

파공법으로 정밀화약 대신 일반화약과 분리봉을 이용함으로써 장약밀도의 조절이 가능한 방법이다. 실제 터널현장에 N.D.C 발파공법을 적용한 결과 여굴량이 기존보다 약 30% 정도 감소되는 효과를 얻었다.

본 발파공법을 통해 지반조건에 따른 합리적인 발파패턴 설정이 가능하고, 폭력이 높은 일반화약을 정밀폭약처럼 이용할 수 있어 경암 이상에서도 확실한 발파효과를 볼 수 있었다. 이에 따라 미굴을 우려하여 굴착선 바깥으로 천공하는 현상을 개선할 수 있어 여굴을 상당부분 줄일 수 있게 되었으며, 이를 통해 외곽공 화약비의 절감뿐 아니라, 여굴에 대한 슛크리트, 라이닝 등의 추가로 투입되는 보강비의 저감 및 버력량 감소에 따른 공기 및 공사비 감소에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

6. 감사의 글

본 연구활동을 위해 화약의 순폭시험을 협조해주신 (주)한화 인천공장 김종봉 전무님과 품질보증부의 한승훈 팀장님 이하 직원 여러분께 감사드리고, 현장시험을 협조해주신 LG건설(주) 경춘선 복선공사 현장의 오채석 소장님과 직원 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 문현구, 1996, "암분류와 발파효율에 대한 기초연구", 한국자원연구소, pp.93~106.
2. 한국도로공사 도로연구소, 2000, "여굴최소화를 위한 최적발파패턴 설계방안에 관한 연구"
3. Andrew Scott, 1996, "'Blastability' and blast design", *Proc. 5th Inter. Symp. on*

Rock Fragmentation by Blasting, Montreal, pp.27~36.

4. Lewandowski, T., Luan Mai, V.K. & Danell, R., 1996, "Influence of discontinuities on presplitting effectiveness", *Proc. 5th Inter. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting*, Montreal, pp.217~225.
5. Lilly, P., 1986, "An empirical method of assessing rock mass blastability", *Large Open Pit Mining Conf.*, Newman, pp. 89~92.
6. Liqing Liu & P.D. Katsabanis, 1996, "Numerical modelling of the effects of air decking/decoupling in production and controlled blasting", *Proc. 5th Inter. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting*, Montreal, pp.319~330.
7. Singh, S., 2000, "The influence of rock mass characteristics on overbreak control", *Proc. of 26th annual Conf. on Explosives. and Blasting Technique*, Anaheim, Vol. 2, pp.117~129.
8. Tariq, S.M., & Worsey, P.N., 1996, "An investigation into the effect of varying joint aperture and nature of surface on pre splitting", *Proc. of 12th Symp. on Explosives. and Blasting Research*, Orlando, pp.186~195.
9. Worsey, P.N., & Qu, S., 1987, "Effect of joint separation and filling on pre split blasting", *Proc. 3rd Mini Symp. on Explosives. and Blasting Research*, Miami, pp.26~40.